

# 津波来襲時の係留船舶被害予測

東亜建設工業（株）土木本部設計部 栗原明夫  
土木本部防災技術室 青野利夫

## 1. はじめに

津波来襲時には、船舶は港外退避が原則であるが、狭い航路や曳船数の制約から、津波来襲までの短い時間の間に港内に係留している全ての大型船舶を退避させることは不可能に近い。また、荷役中の船舶は地震による荷役用設備の故障などで離岸できない可能性もある。

本報告では、これらの津波による係留船舶および係留施設の被害を予測し、対策案の提示を可能とする「係留船舶被害予測システム」の概要について述べる。本システム開発過程においては、水理模型実験を実施して津波による係留船舶の動揺特性を明らかにするとともに、津波に対する船体動揺解析の適用性検討を行った。これらの検討概要についても報告する。

## 2. 被害予測の概要

図-1 に、被害予測システムのフローを示す。津波による係留船舶被害予測では、津波解析と津波による船体動揺解析を組み合わせ、任意の港湾、船舶に対してピンポイントで被害予測を行い、その対策案を提示するものである。

以下の章では、津波による船体動揺実験、船体動揺解析の適用性検討、津波解析の概要について示す。

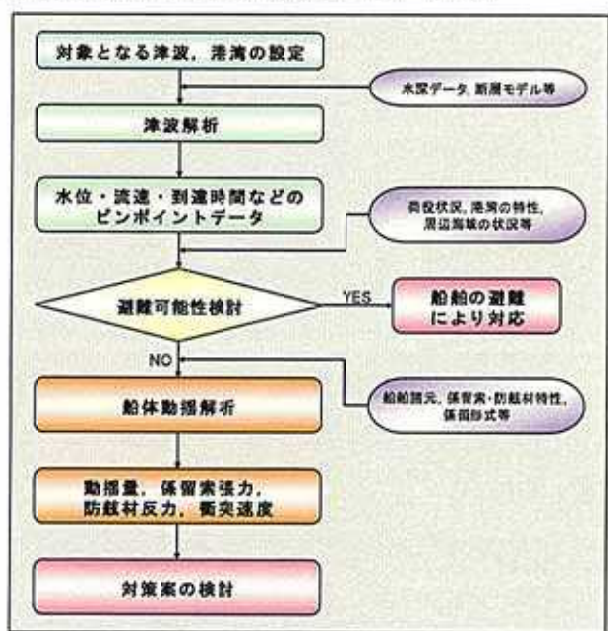


図-1 被害予測フロー

## 3. 津波による船体動揺実験の概要

### (1) 実験水路および縮尺

実験は、図-2 に示す水路長 50.0m×水路幅 1.0m×深さ 1.5mの2次元造波水路にて行った。実験の縮尺は1/50とした。この縮尺では、現地スケールで周期1分程度であれば、静水面からの津波高さ3m程度の造波は可能であるが、周期の長いケースと比較するため、最大津波高さは1.5mとしている。

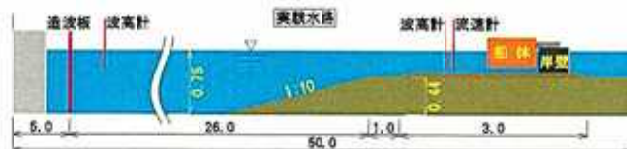


図-2 実験水路の概略図

### (2) 実験模型

#### a) 船体模型

対象とした船舶はパナマックス7万DWT級であり、岸壁およびドルフィンに係留された状態で津波を作用させた。実験の縮尺を極力大きくするため、船体模型は、船体中央部の断面形状で船軸方向に一樣な2次元模型とした。このため、本実験で対象とする船体挙動は、Sway, Heave, Rollの3項目である。

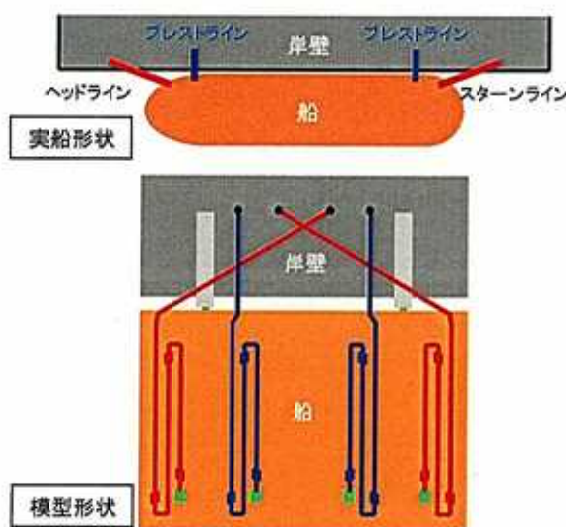


図-3 実験模型の概略図

b) 防舷材模型

防舷材は定反力型を対象とし、コイルバネ、スライダ、重錘を組み合わせて、その特性を再現した。防舷材の前には、1箇所当り上下2個の荷重計を取り付け、船体衝突時の荷重を計測した。図-4は防舷材模型の反力-変位特性を示したものである。ヒステリシス特性を含めて良好な再現性を示している。

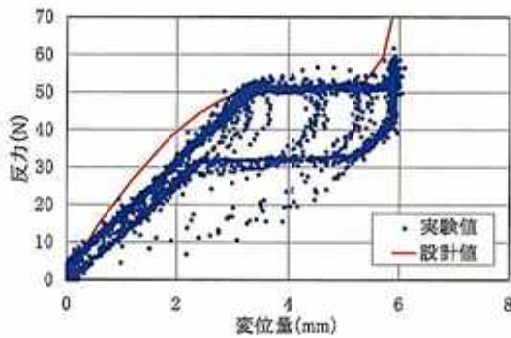


図-4 防舷材模型の特性

c) 係留索模型

係留索は索径 65mm のナイロンロープを対象とした。その張力特性は3種類のコイルバネを組み合わせてバネ定数を近似した。図-5は係留索模型の外力-変位特性を示したものであり、良好な再現性を示している。

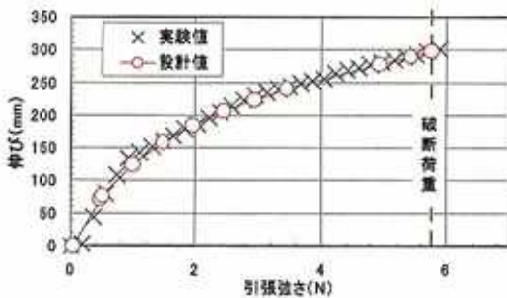


図-5 係留索模型の特性

(3) 実験ケース

実験ケースは、表-1に示すように係留施設、周期、津波高、潮位、喫水、係留状態を適宜組み合わせるとともに、津波が引波で始まるケース（引波初動）と押波で始まるケース（押波初動）についても実施し、各ケース3回ずつ繰り返し実験を行った。

表-1 実験ケース

縮尺	1/50
係留施設	岸壁、ドルフィン
周期	1, 3, 5, 15 min
津波高	0.25, 0.50, 1.00, 1.50m
水深	13.0m
潮位	H.W.L±1.70m, L.W.L±0.0m
喫水(観荷状態)	8.0m(空載), 12.0m(観載)
係留状態(係留索本数)	ヘッドラインのみ(2本), プレストレス増し取り(4本)
津波の始まり	引波初動, 押波初動

※数値は現地スケール

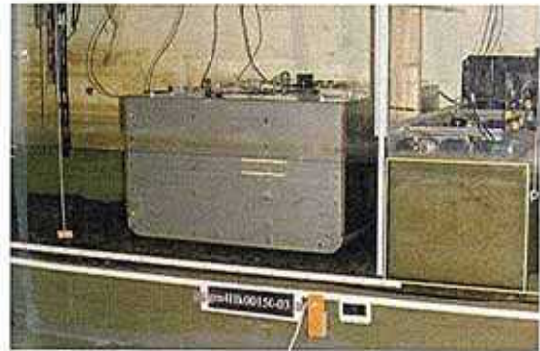


図-6 実験状況

(4) 実験結果

a) 計測波形の一例

図-7は、空載状態の岸壁係留で、周期3分で津波高 1.0 mの津波を引波初動で作用させた場合の計測波形を示したものである。Heaveは水面変位に同調している。また、Rollは、ほとんど生じておらず、防舷材衝突時の衝撃によってわずかに起こる程度である。Heave, Rollについては、全てのケースで同様の特徴を示していた。

一方 Sway は、船体の質量や係留状態など、条件の違いによってその特性が大きく異なっている。津波作用時の係留船舶の挙動特性は、Sway 動揺量に顕著に現れることがわかった。

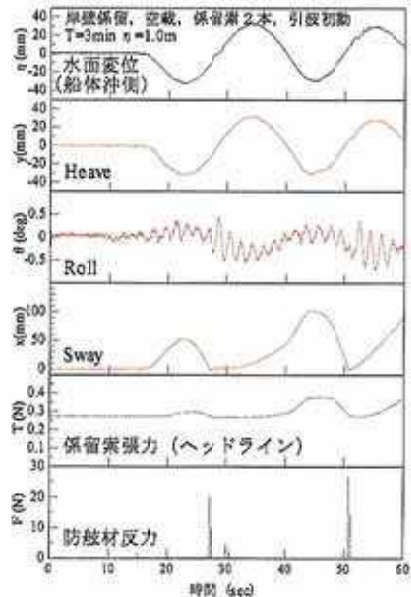


図-7 計測波形の一例

b) Sway 動揺量の実験結果

図-8に引波初動観載時の、津波高と Sway 動揺量の関係を示す。Sway 動揺量は全体的に大きく、係留索が破断する程度まで沖合に引き離されるケースも認められる。岸壁係留に対してドルフィン係留では、同程度の津波高に対する Sway 動揺量が大幅に大きくなる傾向がある。



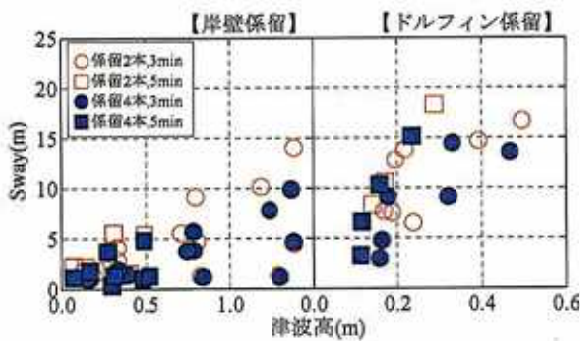


図-8 津波高と Sway 動揺量の関係 (引波初動, 満載時)

### c) 船体衝突速度の実験結果

図-9 に引波初動満載時の、津波高と岸壁への船体衝突速度の関係を示す。衝突速度は全体的に大きく、一般的な接岸速度である 10~15cm/s を大きく上回るケースが多く見られた。また岸壁係留に対してドルフィン係留では、同程度の津波高に対する衝突速度が大幅に大きくなる傾向がある。

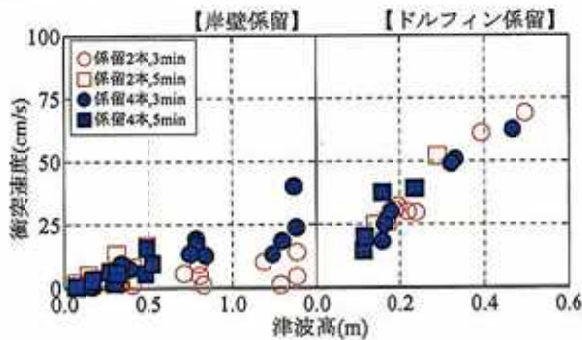


図-9 津波高と衝突速度の関係 (引波初動, 満載時)

### (5) 実験結果のまとめ

今回の実験により得られた主要な結果を以下に示す。

- ① 津波と風波・うねりでは動揺特性が異なる。
- ② 岸壁係留よりもドルフィン係留のほうが Sway 動揺量、衝突速度が大きくなり危険である。
- ③ 船体の衝突速度は、一般的な接岸速度である 10~15cm/s を大きく超えるケースが多く見られた。
- ④ 予測津波高が小さい港湾でも被災の可能性はある。

## 4. 津波による船体動揺解析

### (1) 動揺解析手法

津波による船体動揺実験について、風波やうねりに対する船体動揺解析で一般的に用いられるストリップ法および三次元特異点分布法の 2 通りの手法で再現計算を行い、適用性の検討を行った。

入射波条件には、周期 3, 5min の規則波を用いた。また、Sway および Roll の粘性減衰係数は、通常波浪レベルの周期 8s および 12s の実験結果を用いた感度分析により設定した。

## (2) 計算結果

### a) Sway 動揺量の実験値と計算値の比較

図-10, 図-11 に、岸壁係留およびドルフィン係留の Sway 動揺量の最大値について、実験値と計算値の比較を示す。実験、計算ともに周期 3min, 係留索 2 本のケースで Sway 動揺量が大きい値を示している。三次元特異点分布法とストリップ法のどちらの手法においても、概ね Sway 動揺量を再現している。

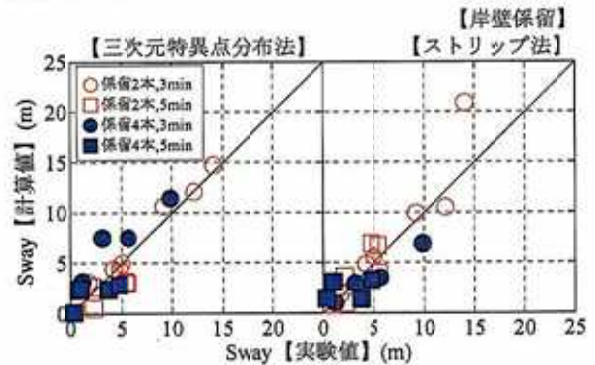


図-10 Sway 動揺量の実験値と計算値 (岸壁係留)

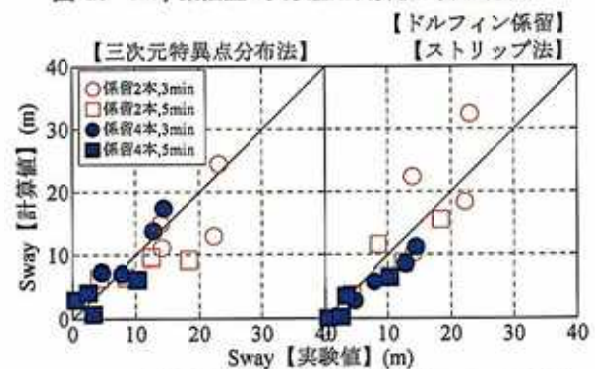


図-11 Sway 動揺量の実験値と計算値 (ドルフィン係留)

### b) 衝突速度の実験値と計算値の比較

図-12, 図-13 に、防舷材への衝突速度の実験値と計算値の比較を示す。衝突速度は、Sway 動揺量の時間微分により船体の速度を算出し、防舷材反力が最大となる直前の最大値としている。衝突速度の計算値は、ばらつきはあるものの概ね実験値を再現できている。

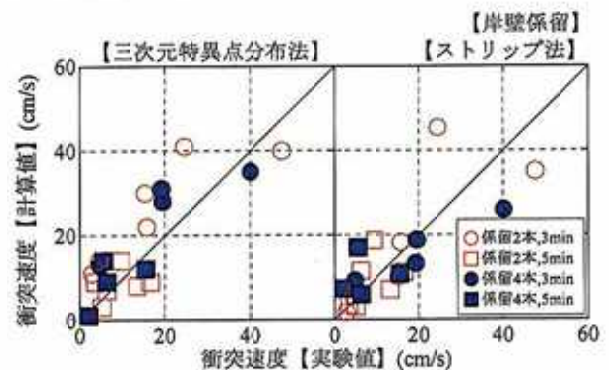


図-12 衝突速度の実験値と計算値 (岸壁係留)



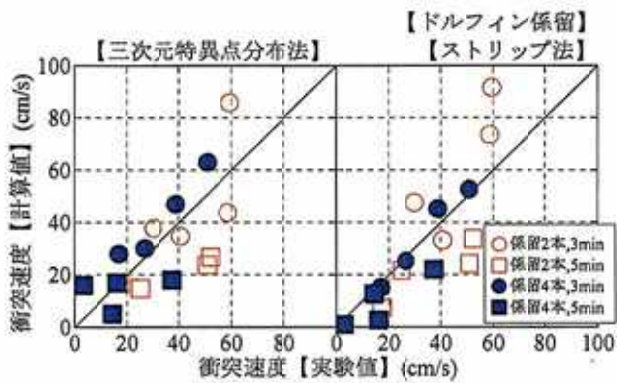


図-13 衝突速度の実験値と計算値 (ドルフィン係留)

(3) 計算結果のまとめ

津波による船体動揺量は、三次元特異点分布法およびストリップ法ともに再現性が高く、両手法の明確な違いは見られなかった。動揺解析により任意の津波、係留施設、船舶の組み合わせに対する係留施設への影響を評価することが可能であることが確認された。

5. 津波シミュレーション

津波の数値解析は、長波系モデルを用いて実施した。津波の初期条件としては、地震断層モデルを用いて計算される海底地殻変動の鉛直成分を海面上の水位変動として与える方法を用いた (Mansinha and Smylie, 1971)。津波解析例として、南海道地震津波(線形長波)およびチリ地震津波(線形分散波)の伝播状況を図-14、図-15にそれぞれ示す。

また、図-16に南海道地震津波による神戸港周辺海域の流

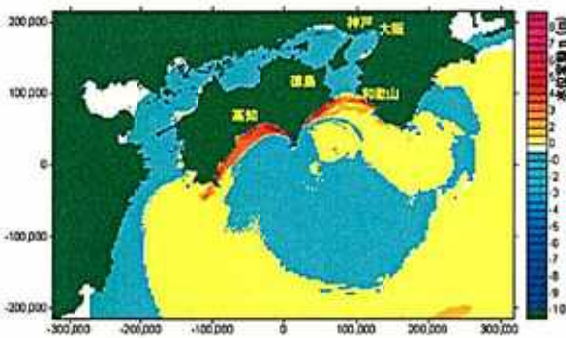


図-14 津波伝播状況 (南海道地震津波)

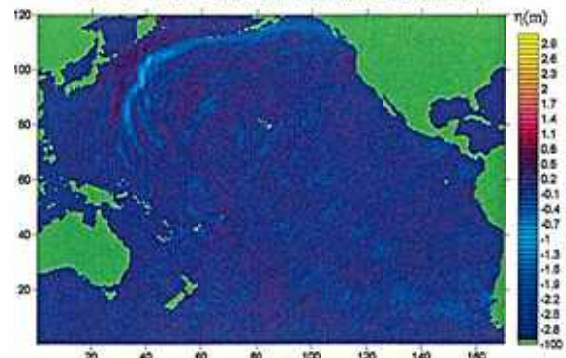


図-15 津波伝播状況 (チリ地震津波)

速分布を示す。このように津波解析では任意地点の水位、流速、到達時間を予測することが可能である。

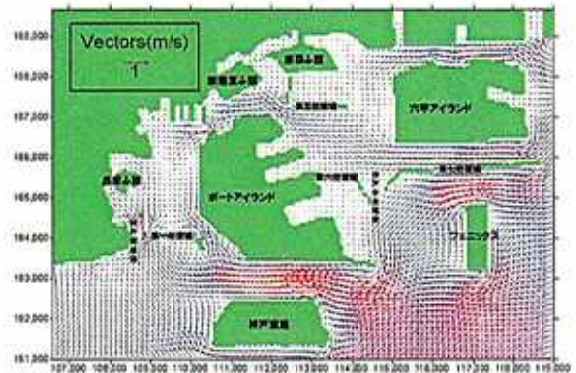


図-16 神戸港周辺の流速分布 (南海道地震津波)

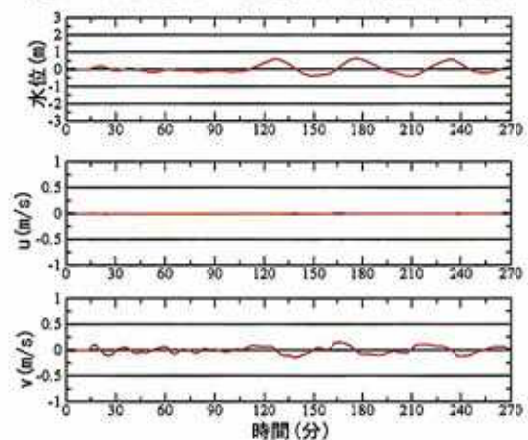


図-17 任意地点の水位、流速の経時変化の例

6. まとめ

船舶動揺シミュレーションにより、津波による船体の挙動や係留索の張力、防舷材への衝突力を的確に評価でき、被害の推定、対策の有効性の検討が可能となった。

この船舶動揺シミュレーションと、津波シミュレーションにより求めた、評価対象地点での水位変動推定結果をリンクすることで、任意の津波・係留施設・船舶の組み合わせに対する係留施設への影響をピンポイントで評価することが可能となった。また、係留施設への影響に対して、最善の対策を検討することができる。

参考文献

津田宗男・青野利夫・栗原明夫・中屋行雄・大木泰憲・高山知司 (2006): 津波による大型係留船舶の動揺特性と係留施設へ影響, 海岸工学論文集, 第 53 巻, 投稿中。  
 津田宗男・大木泰憲・高山知司・東野洋司・林秀和 (2006): 津波による係留船舶の動揺特性および係留施設への衝突力に関する模型実験, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.535-540。  
 中屋行雄・津田宗男・青野利夫・杉浦秀之・本多将人 (2005): 港湾内へ進行する津波の推定と係留船舶への影響評価の試み, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.133-138。